

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Vliv místního tepelného zpracování na vlastnosti
svarových spojů**

**Local Heat Treatment Influence on Weld Joints
Properties**

Autor: Terezie Zdrálková

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Sondel, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Terezie Zdrálková**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Vliv místního tepelného zpracování na vlastnosti svarových spojů**
Local Heat Treatment Influence on Weld Joints Properties

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii svařování C-Mn ocelí.
2. Navrhněte technologii svařování kontrolních svarových spojů.
3. Navrhněte technologický postup tepelného zpracování.
4. Navrhněte zkoušky mechanických vlastností.
5. Proveďte vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

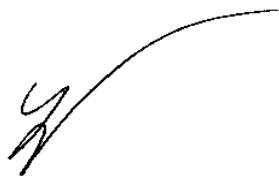
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Sondel, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

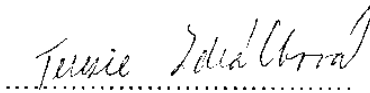
Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

v Ostravě.....17.5.2013.....Terezie Zedáková
jméno a příjmení

Prohlašuji, že:

- jsem byla seznámena s tím, že se na moji bakalářskou práci plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

v Ostravě dne 17. 5. 2013


.....

Jméno a příjmení autora práce: Terezie Zdrálková

Adresa trvalého pobytu: Podroužkova 1681, 708 00, Ostrava-Poruba

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu práce panu Ing. Martinu Sondelovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování mé bakalářské práce.

Panu Ing. Vítu Vorobelovi děkuji za rady a trpělivý přístup k mým otázkám.

Ráda bych poděkovala mé rodině a mým přátelům, všeobecně za podporu a toleranci při studiu a při zpracování mé bakalářské práce.

Anotace

Bakalářská práce „*Vliv místního tepelného zpracování na vlastnosti svarových spojů*“, pojednává o vyhledání nejvhodnějšího způsobu tepelného zpracování po svařování povrchu odlitků z C-Mn ocelí. Pomocí experimentu bude možno zjistit optimální parametry pro místní tepelné zpracování po svařování. Výsledkem práce bude konkrétní návrh režimu tepelného zpracování, který bude aplikován po opravě vad odlitků z C-Mn oceli svařováním.

Klíčová slova

C-Mn oceli, ruční obloukové svařování obalenou elektrodou, lokální tepelné zpracování po svařování, destruktivní zkoušky.

Summary

The bachelor thesis „*Local Heat Treatment Influence on Weld Joints Properties*“, deals with finding the best way of the heat treatment after welding surface of the C-Mn steel castings. By means of the experiment it will be possible to determine optimal parameters for local heat treatment after welding. The thesis result will be a specific design of the heat treatment mode, which will be applied after fixing defects of the C-Mn steel castings by welding.

Keywords

C-Mn steels, manual metal-arc welding, local post-weld heat treatment, destructive testing.

Seznam použitých zkratk a symbolů:

zkratka/ symbol	popis	jednotka
A _{C3}	překrystalizační teplota	[°C]
A _{C1}	normalizační teplota	[°C]
A ₅	tažnost	[%]
C _E	ekvivalentní obsah uhlíku	[hm. %]
CET	uhlíkový ekvivalent (dle normy ČSN EN1011-2)	[%]
C-Mn	uhlíkovo-manganový, (-vá), (-vé)	
ČR	Česká republika	
ČSN	Česká státní norma	
EN	Evropská norma	
H.C.S	hodnocení náchylnosti k teplým trhlinám	
HD	objem difuzního vodíku	[ml·100g ⁻¹]
HV	tvrdost dle Vickerse (zkouška je dána normou ČSN EN ISO 6507-1)	[-]
I	proud	[A]
IIW	International Institut of Welding	
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	
KV	nárazová práce u vrubu tvaru V	[J]
PA	poloha svařování vodorovná shora	
R _e	mez pevnosti v kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
SK	svarový kov	
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
T _{pCET}	teplota předeřevu	[°C]
TZ	tepelné zpracování	
U	napětí	[V]
Z	kontrakce	[%]
ZM	základní materiál	
atd.	a tak dále	
atp.	a tak podobně	
cca	přibližně	
č.	číslo	
čl.	článek	
h.	hloubka	
max.	maximálně	
např.	například	
obr.	obrázek	
s	tloušťka materiálu	[mm]
tj.	to je	
tzv.	tak zvaný, tak zvaná	
tzn.	to znamená	
viz	rozkazovací způsob slovesa vidět	
zv.	zvětšeno	

Obsah

1	ÚVOD A CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	1
1.1.	Význam oprav povrchových vad ve výrobě odlitků z C-Mn ocelí	1
1.2.	Charakteristika cíle.....	2
2	STUDIE SVAŘOVÁNÍ C-MN OCELÍ.....	4
2.1	Studie C-Mn ocelí.....	4
2.2	Svařitelnost C-Mn ocelí	5
2.2.1	Prvky ovlivňující svařitelnost C-Mn ocelí	6
2.2.2	Předehřev a dohřev C-Mn ocelí	12
2.2.3	Náchylnost na vznik teplých trhlin	13
2.3	Tepelné zpracování C-Mn ocelí po svařování	14
2.3.1	Tepelné zpracování s překrytí.....	15
3	NÁVRH TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ KONTROLNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ 17	
3.1	Charakteristické vlastnosti materiálu experimentální desky	17
3.2	Příprava experimentální desky ke svařování	18
3.3	Návrh svařování experimentální desky.....	19
3.4	Provedení experimentálního svařování	20
4	NÁVRH TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ SVAROVÝCH SPOJŮ.....	21
4.1	Návrh režimů indukčního lokálního tepelného zpracování.....	22
4.2	Provedení postupu indukčního lokálního tepelného zpracování	24
5	NÁVRH ZKOUŠEK MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SVAROVÉHO KOVU ..	25
5.1	Popis destruktivních zkoušek mechanických vlastností svarového spoje	25
5.1.1	Zkoušky tvrdosti svarového spoje.....	26
5.1.2	Zkoušky rázem v ohybu.....	30
5.1.3	Příčná zkouška tahem	33
5.1.4	Zkoušky makro a mikrostruktury svarového spoje	36
6	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	40
6.1	Návrh optimálního režimu indukčního lokálního tepelného zpracování.....	42
7	ZÁVĚR	43
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	44
9	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	45
10	SEZNAM PŘÍLOH	45

1 ÚVOD A CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

1.1. Význam oprav povrchových vad ve výrobě odlitků z C-Mn ocelí

Za jakostní považujeme takový odlitek, který nemá žádné zjevné nebo skryté vady např. staženiny, bubliny, trhliny či deformace. Vykazuje čistý povrch zbavený zbytků formovací směsi a nerovností, bez ohledu na další parametry (chemické složení a mechanické vlastnosti). Obecně pak vzhledem ke všem parametrům jakost odlitku chápeme jako jeho vhodnost pro užívání [6].

Na površích odlitých výrobků v jedné významné ostravské strojírenské firmě, se občas vytvoří povrchové vady. Tato bakalářská práce se zabývá opravou vady jedné z nich, to je opravou povrchové vady vzniklé do hloubky 20 mm.

Díky novým metodám a technologiím navařování a svařování, se může v průmyslu dosahovat při opravách povrchových vad velkých odlitků velmi dobrých výsledků. V odlitcích, které jsou velkých rozměrů a hmotností (hřídele, čepy, prstence atd.), nachází kontrola vady, vměstky, povrchové trhliny. Z důvodu výskytu těchto vad požaduje zákazník snížení ceny výrobku nebo odstoupení od kupní smlouvy. Přitom se v některých případech mohou drobné povrchové vady vybrousit a následně zavařit. Vhodný režim tepelného zpracování po svařování je zde jednou z podmínek pro vytvoření plnohodnotného výrobku. Opravený výrobek je tak možno prodávat za nesníženou cenu.

1.2. Charakteristika cíle

Cílem této práce je sledování a vyhodnocení změn mechanických vlastností pod povrchem svarového spoje při provedení simulace oprav svařováním s následným lokálním tepelným zpracováním. Výsledkem je pak optimální režim lokálního tepelného zpracování.

V teoretické části bakalářské práce je proveden rozbor C-Mn oceli, její svařitelnost a tepelné zpracování s překrystalizací C-Mn ocelí po svařování.

V praktické části se pojednává o návrhu příslušné metody pro svařování experimentální desky z oceli GS24Mn6, návrhu různých režimů indukčního lokálního tepelného zpracování svarového spoje a požadovaných destruktivních zkoušek.

Výsledky destruktivních zkoušek pro různé režimy indukčního lokálního tepelného zpracování jsou vyhodnoceny a porovnány s vlastnostmi materiálu svarového kovu bez tepelného zpracování a nesvařovaným základním materiálem experimentální desky. Závěrem je navržen nejpriznivější režim indukčního lokálního tepelného zpracování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

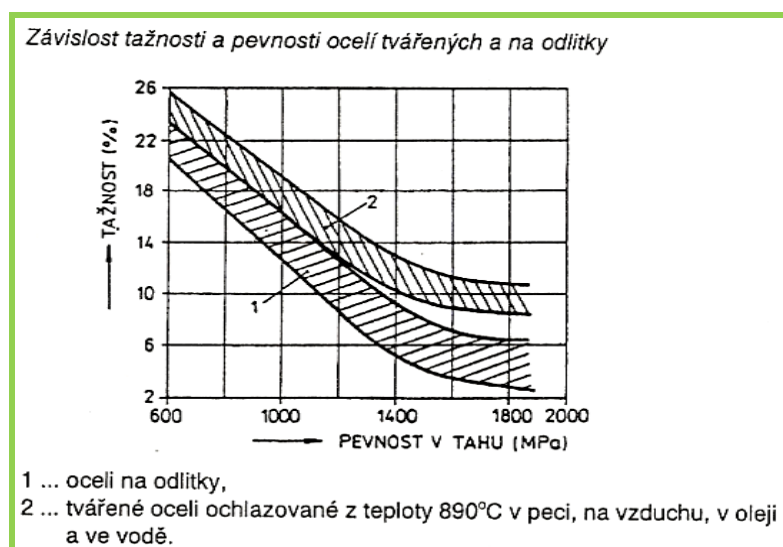
2 STUDIE SVAŘOVÁNÍ C-Mn OCELÍ

2.1 Studie C-Mn ocelí

Nízkolegované manganové oceli s nízkým obsahem uhlíku jsou vhodné na odlitky, u kterých se žádá vysoká houževnatost a dobrá svařitelnost. Zvýšený obsah manganu umožňuje snížit obsah uhlíku. Odlitky s větší tloušťkou stěny odlité z nízkolegované manganové oceli mají sklon k růstu zrna při tepelném zpracování. Aby se získalo jemné zrna a tím i lepší mechanické vlastnosti, legují se tyto oceli malým množstvím vanadu [3].

Mechanické vlastnosti těchto ocelí, zejména pevnost, jsou určeny obsahem uhlíku a manganu. Obsah uhlíku se pohybuje do úrovně maximálně 0,22 hm % a manganu do 1,6 hm %.

Oceli na odlitky na obrázku 2.1 mají nižší plastické vlastnosti než oceli tvářené [3]. Pro zlepšení slévárenských vlastností ocelí na odlitky, mají oceli obvykle vyšší obsah C, Mn, Si.



Obr. 2.1 Závislost tažnosti a pevnosti [3]

K popsáním fyzikálně-metalurgickým změnám C-Mn ocelí je třeba dodat i vliv obsahu nečistot, zejména síry ve formě sulfidů typu MnS. Snížení obsahu síry znamená při svařování zvýšení tvrdosti hrubozrnné struktury a dochází k zvýšení náchylnosti ocelí s nízkým obsahem síry na vznik studených trhlin.

2.2 Svařitelnost C-Mn ocelí

Mezi faktory ovlivňující vlastnosti uhlíkově-manganových ocelí vyvolané svařováním jsou mimo jiné i jejich chemické složení.

Svařitelnost je komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost kovu na zhotovení svaru s požadovaným účelem, při určitých technologických možnostech svařování a konstrukční spolehlivosti svarového spoje. Svařitelnost není pouze otázka materiálu, ale také technologie a konstrukce. Vhodnost kovu k svařování je určena chemickým složením, metalurgickým způsobem výroby, způsobem odlévání, tváření a tepelným zpracováním.

Na posouzení vlivu chemického složení oceli na vlastnosti hrubozrnného pásma svarových spojů je nejvhodnější parametr uhlíkový ekvivalent C_E .

Rovnice 2.2 uvádí výpočet uhlíkového ekvivalentu dle IIW. Je vhodná pro materiály s obsahem uhlíku $C < 0,25 \text{ hm } \%$ [1].

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cu + Ni)}{15} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} \quad [\%] \quad (2.2)$$

Se zvyšující se hodnotou obsahu uhlíku a C_E se svařitelnost oceli zhoršuje. Vhodnost oceli na svařování je také vázána na tepelný příkon při svařování a případný přehřev.

Technologická možnost svařování je určována metodou svařování, přídavným materiálem, tepelným příkonem, postupem kladení vrstev svaru, tepelným režimem svařování, a tepelným zpracováním svarového spoje.

2.2.1 Prvky ovlivňující svařitelnost C-Mn ocelí [1, 3]

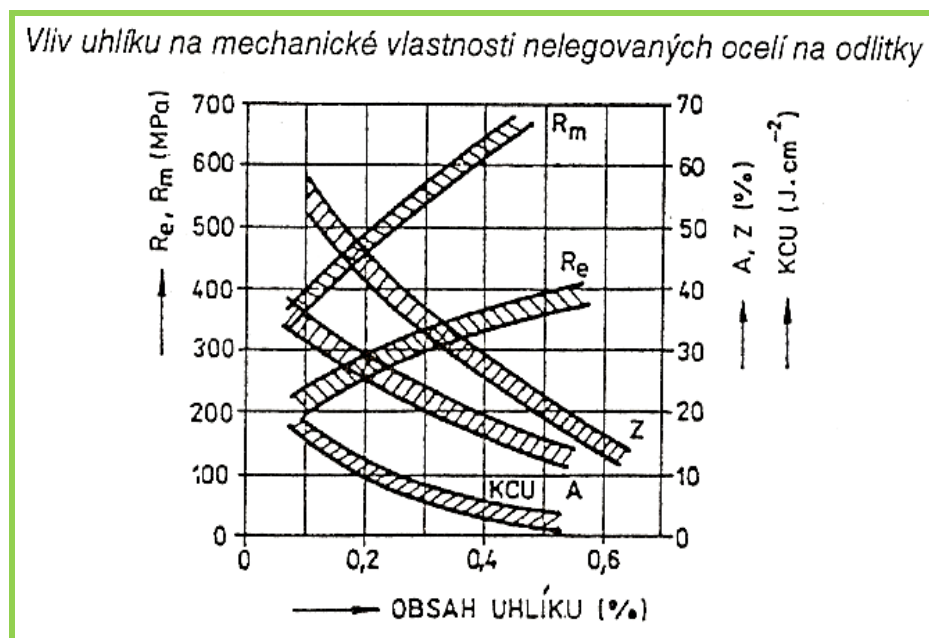
Mezi prvky, které ovlivňují svařitelnost C-Mn ocelí určených na odlitky, patří především uhlík, mangan, křemík, nikl, chrom, molybden, vanad, fosfor a síra.

Uhlík (chemická značka C).

Nejdůležitější prvek obsažený v ocelích je uhlík. Zásadní dopad na vlastnosti materiálu mají i malé změny koncentrace. Vyskytuje se jako elementární ve dvou modifikacích (grafit, diamant) i ve velkém počtu organických sloučenin.

Při svařování uhlíkových ocelí s obsahem uhlíku větším než 0,25 hm % je nutné předepsat předehřev, dohřev a tepelné zpracování pro zabránění vzniku studených trhlin [1].

Na obrázku 2.2.1 je znázorněn vliv obsahu uhlíku na mechanické vlastnosti oceli na odlitky [3].



Obr. 2.2.1 Vliv uhlíku na mechanické vlastnosti [3]

Mangan (chemická značka Mn)

Mangan patří mezi austenitotvorné prvky. Ve slitinách Fe-Mn-C je část manganu rozpuštěna v základní kovové matici, část tvoří podvojný karbid. Rozdělovací koeficient závisí na obsahu manganu a uhlíku. Mangan rozpuštěný ve feritu zvyšuje jeho pevnostní vlastnosti a snižuje tažnost. Mangan zvyšuje v matici oceli s vyšším obsahem uhlíku množství zbytkového austenitu po kalení. Při vyšším obsahu uhlíku a manganu se transformace austenitu úplně potlačí a oceli mají austenitickou matici. Manganové oceli jsou citlivé na zhrubnutí zrna, takže je nutné při tepelném zpracování dodržovat austenitizační teplotu.

Mangan se často používá k legování konstrukčních ocelí, zejména v kombinaci s jinými prvky, protože je laciný a snadno dostupný. U běžných konstrukčních ocelí se používá až do obsahu 2 %. Při legování oceli manganem je nutno počítat s jeho malou difúzní rychlostí.

Křemík (chemická značka Si)

Křemík patří do skupiny silně feritotvorných prvků. Křemík netvoří v ocelích karbidy, ale úplně se rozpouští ve feritu, jehož pevnost zvyšuje. Prokalitelnost zvyšuje méně než chrom a mangan. Nedostatek křemíku způsobuje, že je ocel neuklidněná. Až do obsahu 0,5 hm % se křemík nepovažuje za legovací prvek, ale za dezoxidační přísadu.

Nikl (chemická značka Ni)

Nikl patří mezi austenitotvorné prvky. Při tepelném zpracování zvyšuje nikl prokalitelnost. Zvýšení prokalitelnosti je však podstatně menší než v případě manganu nebo chromu. Nikl zvyšuje pevnost více než chrom, ale méně než mangan a křemík. V normalizačně žíhaných ocelích zjemňuje perlit. Nikl je drahý, proto není zvýšení pevnosti úměrné ceně. Nikl se používá hlavně v ocelích, které mají mít vysokou houževnatost zejména při nízkých teplotách. Dále zlepšuje vlastnosti, jako jsou plasticita a mez kluzu.

Chrom (chemická značka Cr)

Chrom patří do skupiny feritotvorných prvků. Výrazně ovlivňuje svarový kov. Při legování chromem je důležité zvýšit teplotu přehřevu, k zabránění vzniku studených trhlin ve svarovém spoji. U nízkolegovaných ocelí na zušlechťování se obvykle využívá vlivu chromu na zvýšení prokalitelnosti. Zvýšení prokalitelnosti je však podmíněno rozpuštěním karbidů chromu při austenitizaci, protože prokalitelnost zvyšuje pouze chrom rozpuštěný v austenitu. Nerozpuštěné karbidy naopak působí jako krystalizační zárodky, které prokalitelnost naopak snižují. S tímto jevem je nutné počítat při stanovení kalicí teploty, protože karbidy chromu se rozpouští až při vyšších teplotách. Při pomalém ochlazování z vyšších popouštěcích teplot se objevuje vysokoteplotní popouštěcí křehkost. Po popouštění na teplotě nad pásmem popouštěcí křehkosti je nutno ochlazovat ve vodě.

Molybden (chemická značka Mo)

Molybden patří mezi feritotvorné prvky. Část molybdenu se rozpouští ve feritu, jehož tvrdost zvyšuje, část tvoří karbidy. Molybden prodlužuje dobu, po kterou je stabilní při vyšších teplotách. Molybden také snižuje začátek a konec martenzitické transformace. Po zakalení zvyšuje stabilitu martenzitu, tj. posouvá jeho rozpad k vyšším popouštěcím teplotám. Tento vliv je možno využít u zakalených ocelí, pokud je třeba žíhat na snížení pnutí při vyšších teplotách. U zušlechtěných ocelí snižuje přísada Mo vysokoteplotní popouštěcí křehkost. Molybden zlepšuje svařitelnost i odolnost proti korozi a chemickým vlivům.

Vanad (chemická značka V)

Vanad patří mezi silně feritotvorné prvky. Vanad tvoří s uhlíkem velmi stabilní karbid VC. V ocelích má však proměnlivé složení. Jiné typy karbidů vanad v ocelích netvoří, může se však částečně rozpouštět v cementitu. Karbidy vanadu mají vysokou tvrdost, pohybující se okolo 2500 HV. Při nízkém obsahu vanadu se tvoří jemné globulární karbidy, které zpomalují růst zrna austenitu. Vliv vanadu na zjemnění zrna se používá u některých ocelí. Vliv vanadu na mechanické vlastnosti závisí ve velké míře na kalicí teplotě tj. na stupni rozpuštění vanadu v austenitu. Pokud se kalí oceli s přísadou vanadu z normální teploty, získávají se menší tvrdosti, protože část uhlíku zůstává vázána jako karbid vanaditý. Přísada vanadu se obvykle kombinuje s jinými legujícími prvky. Vanad zlepšuje únavové vlastnosti, odolnost proti opotřebení a snižuje náchylnost ke stárnutí. Dále zlepšuje odolnost proti popouštění a přehřátí. Zvyšuje mez pevnosti a zlepšuje svařitelnost.

Fosfor (chemická značka P)

Fosfor zvyšuje tvrdost feritu a způsobuje sklon oceli ke křehkému lomu při teplotách kolem 300°C. Na druhé straně zlepšuje korozní vlastnosti oceli. Zvyšuje pevnost a tvrdost v návaznosti na obsah uhlíku v oceli.

Síra (chemická značka S)

Síra při vyšších obsazích, pokud je vázána na železo, zhoršuje vlastnosti oceli. Tvoří s austenitem nízkotavitelné eutektikum (988°C), které se vytváří podél hranic zrn a způsobuje ztrátu tvárnosti při této teplotě. Síra způsobuje lámavost oceli, zvyšuje obrobitelnost.

Kyslík (chemická značka O)

Kyslík se v roztavené svarové lázni a v oblasti sloupce elektrického oblouku bude nacházet ve třech formách: molekulární, atomární a ionizovaný. První dva reagují oxidační reakcí přímo s kovovými prvky na oxidy. Se železem tak tvoří kyslík tři oxidy: FeO (železnatý), Fe_2O_3 (železitý) a Fe_3O_4 (železnatoželezitý). Pokud jsou svarové plochy znečištěny vyššími oxidy železa (rez) a vysokým obsahem Fe_2O_3 v tavidle, zvyšuje se obsah kyslíku ve svarové lázni. Rozpustí-li se vznikající oxid ve svarové lázni, je v ní nositelem kyslíku. Jako jediný se ve svarové lázni rozpouští FeO . Se stoupající teplotou jeho rozpustnost roste. Stoupá k povrchu svarové lázně a vytváří na ní jemnou vrstvičku okují. Když není FeO vázán např. struskou, vrací se zpět do svarové lázně a tím dochází k jejímu obohacování kyslíkem. Škodlivost kyslíku ve svarovém kovu se projevuje precipitačními procesy oxidů železa. Zůstane-li kyslík ve svarovém kovu, zhorší se jeho mechanické vlastnosti. Za pomoci kovů, které mají zvýšenou schopnost slučovat se s kyslíkem, se dezoxidují svarové lázně. K dezoxidaci svarové lázně se nejčastěji používá ferosicilia (FeSi), feromanganu (FeMn) a ferotitanu (FeTi). Ty vážou vytvořený FeO tím, že s jeho kyslíkem vytvoří jiné, v železe již nerozpustné oxidy.

Dusík (chemická značka N)

Podle přístupu vzduchu ke svarové lázni je ve svaru různé množství dusíku. Atmosférický vzduch obsahuje 78 % dusíku. Ten v nejvyšší míře ovlivňuje jakost svarového kovu. Příčinou pórů nebo vzniku nitridů může být dusík. Když klesá teplota svarového kovu dostatečně pomalu, dochází k uvolňování dusíku bez vzniku pórů. Probíhá-li proces chlazení svarového kovu příliš rychle, jsou všechny předpoklady pro vznik pórovitosti. Nepříznivým projevem vlivu dusíku je pokles vrubové houževnatosti. Dusík vyvolá stárnutí svarového spoje.

Vodík (chemická značka H)

Vodík se dostane do svarové lázně z atmosférického vzduchu, z nedostatečně vysušených obalů elektrod, tavidel a ze znečištěného povrchu základního materiálu. Je příčinou řady nežádoucích jevů vedoucích ke zhoršení kvality svarových spojů. Ve svarovém spoji v důsledku změny své modifikace podmiňuje vznik trhlin za studena.

V atomární formě se rozpouští v železe za vysokých teplot. Při teplotě přechodu tekutého železa do tuhého stavu klesá rozpustnost vodíku rychle, při dalším ochlazování již pomaleji. Vodík se při tuhnutí uvolňuje. Difunduje přitom do dutin, mezer, míst struskových vměstků a jiných necelistvostí. Zvyšuje napětí ve svaru a vznikají kruhové trhliny, tzv. vločky. Pokud je napětí způsobené vodíkem menší než pevnost kovu, zůstane vodík uzavřen ve svaru pod tlakem i za normální teploty. Když pak k tomuto napětí přistoupí přídatné napětí od provozního namáhání, vzniká kruhová trhlina, v jejímž středu je obvykle struskový vměstek, dutina. Vznikají takzvané rybí oka.

K zabránění pórů vlivem vodíku se používají tavidla (strusky) s vysokým obsahem fluoridů a určitým množstvím SiO_2 .

2.2.2 Předehřev a dohřev C-Mn ocelí

Předehřev svařované C-Mn oceli snižuje rychlost ochlazování a tím upravuje vlastnosti mikrostruktury. Při obsahu uhlíku $C < 0,25$ hm. % se většinou nemusí svarové spoje předehřívat. O nutnosti použití předehřevu se lze přesvědčit podle metod uvedených v ČSN EN 1011-2 [7].

Je možné, že při svařování C-Mn oceli s nižším obsahem síry je potřebná aplikace předehřevu. A to, i když je hodnota uhlíkového ekvivalentu C_E stejná jako u oceli s vyšším obsahem síry.

Výpočtů předehřevů je celá řada, rozdělení je například podle tloušťky svařovaného materiálu, obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu, vlivu tepelného příkonu a například vlivu chemického složení oceli svarového kovu T_{pCET} podle rovnice 2.2.2 [1].

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.2.2)$$

Snížení obsahu nežádoucího vodíku ve svarovém kovu se provádí také pomocí dohřevu. Provádí se ihned po svařování. Teplota dohřevu musí být udržována v případě přerušení svařování. Bývá u vícevrstvých svarů shodná s teplotou interpass [7].

Pokud se dá očekávat nebezpečí studeného praskání, nežádoucí vodík se uvolní rychleji při teplotě 200 až 300 °C aplikované okamžitě po svařování. Doba dohřevu závisí na tloušťce svařovaného materiálu a má být nejméně 2 hodiny s ohledem na odzkoušení na simulovaných svarech [7].

2.2.3 Náchylnost na vznik teplotních trhlin

Obtížná svažitelnost ocelí se projevuje také nečistým, málo pevným svarem nebo křehnutím materiálu okolo svaru. Pro předejití těchto nežádoucích jevů můžeme náchylnost ocelí k trhlinám vypočítat podle parametrické rovnice 2.2.3 a následně pak upravit parametry vstupních hodnot při svařování.

$$H.C.S = \frac{C \cdot \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V} \quad [\%] \quad (2.2.3)$$

Pokud je hodnota H.C.S větší než 1,6 %, je ocel náchylná na vznik teplotních trhlin.

Proti vzniku teplotních trhlin je možno použít například snížení měrného příkonu svařování, používat přídatné materiály vysoké čistoty, volit vhodný tvar housenky, předcházet vzniku deformací a napětí [1].

Náchylnost oceli GS24Mn6 k teplotním trhlinám můžeme vypočítat z chemických hodnot oceli podle rovnice 2.2.3.

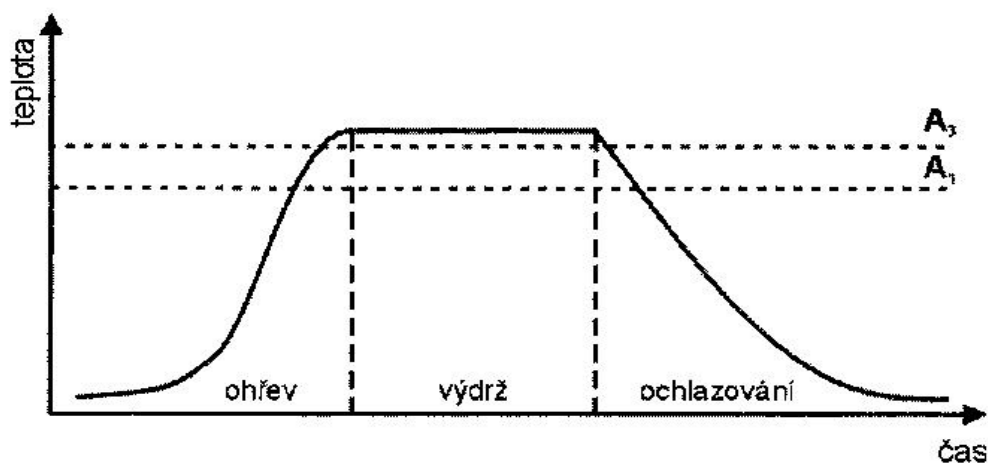
$$H.C.S = \frac{0,21 \cdot \left(0,004 + 0,008 + \frac{0,33}{25} + \frac{0,42}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot 1,69 + 0,1 + 0,05 + 0,003} = 1,182 \%$$

Porovnáním hodnot 1,6 % a 1,182 % je zřejmé, že zkoumaná C-Mn ocel není náchylná na vznik teplotních trhlin.

2.3 Tepelné zpracování C-Mn ocelí po svařování

Tepelné zpracování ovlivňuje užité vlastnosti svařovaného materiálu a svarového kovu. Dochází při něm k cíleným změnám ve struktuře daného materiálu [2].

Základní režim tepelného zpracování spočívá v ohřevu na požadovanou teplotu, výdrži na této teplotě a ochlazování určitou rychlostí. Princip režimu je znázorněn na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Režim tepelného zpracování [2]

Fáze ohřevu materiálu zajišťuje při dosažení příslušné teploty jeho dílčí strukturální změny. Výdrž na zvolené teplotě zajišťuje průběh strukturálních změn a ochlazování nakonec rozhoduje o užitečných vlastnostech svarového spoje.

Účelem tepelného zpracování bývá nejčastěji vyrovnání rozdílů v chemickém složení, odstranění nerovnosti struktury, zjemnění struktury, snížení zbytkových pnutí, zotavení deformovaných zrn, dosažení nízké tvrdosti.

Podle použitých teplot při tepelném zpracování rozeznáváme žíhání s překrystalizací a žíhání bez překrystalizace.

Účinek tepelného zpracování je možné ověřit např. měřením tvrdosti HV 10 a to ve všech oblastech svarového spoje.

2.3.1 Tepelné zpracování s překrystalizací

Snížení plastických vlastností svarového kovu ve srovnání s válcovanými, nebo kovanými základními materiály ovlivňují především hrubozrnná dendritická krystalizace svarového kovu a mikrodefekty ve svarovém kovu. Zlepšení plastických vlastností svarového kovu můžeme dosáhnout tepelným zpracováním na teploty vyšší než A_{c_s} [1].

Normalizační žíhání patří mezi nejpoužívanější postupy tepelného zpracování podeuktoidních ocelí a slouží k dosažení rovnoměrné struktury u odlitků, po tváření, svařování atd. Provádí se při teplotách 30-50 °C nad A_{c_s} svařované oceli. Doba prodlevy se obvykle volí cca 2 minuty na každý milimetr svařené tloušťky. Následně se ochlazuje na vzduchu. Při žíhání dojde ke vzniku jemné a rovnoměrné austenitické struktury, která se po ochlazení transformuje na jemnou a rovnoměrnou feriticko-perlitickou strukturu s příznivými mechanickými vlastnostmi [4].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 NÁVRH TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ KONTROLNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ

3.1 Charakteristické vlastnosti materiálu experimentální desky

K experimentálním pracím byla použita ocel GS24Mn6 dle ČSN 10027.

Ocel GS24Mn6 je vysoce pevnostní ocel s dobrou svařitelností, pro vyšší tlaky a namáhání.

Pro účely svařování je ocel GS24Mn6 zařazena do skupiny 1.3, dle normy TNI CEN ISO/TR 15608:2008. Je to normalizovaná jemnozrnná ocel se zaručenou mezí kluzu $R_e > 360$ MPa.

Hodnoty chemického složení oceli GS24Mn6 v hmotnostních procentech a její mechanické hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 3.1.1 a 3.1.2.

Tab. 3.1.1 Chemické složení GS24Mn6 v hm. %

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	P	S
0,21	1,69	0,33	0,42	0,1	0,05	0,003	0,008	0,004

Tab. 3.1.2 Mechanické hodnoty GS24Mn6

R_m [MPa]	R_e [MPa]	A_5 [%]	KV [J] při -20°C	KV [J] při -30°C
665-667	441-448	22,5-23,2	27	27

3.2 Příprava experimentální desky ke svařování

Pro zkoušky a ověřování vlastností na materiálu GS24Mn6, byla odlita a připravena experimentální deska.

Rozměry experimentální desky jsou 995x135x635mm (délka, výška, šířka), viz příloha 1.

Na desce byly vyfrézovány drážky do hloubky 20 mm. Tvar drážek je uveden v příloze 1. Drážky byly přebroušeny do hladka a do rovna. Byly odstraněny nečistoty.

Na experimentální desce byly vyraženy značky jednotlivých bloků 1, 2, 3, 1.1, 2.1 a 3.1 pro svarové spoje svařené metodou svařování 111.

Detail připravené ocelové desky je na obrázku 3.2: Experimentální ocelová deska připravená k svařování.



Obr. 3.2 Experimentální ocelová deska připravená k svařování

3.3 Návrh svařování experimentální desky

Pro experimentální svařování byla zvolená metoda dle EN ISO 4063 – Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou. Metoda má značení 111. Metoda byla zvolena pro její operativnost při výrobě a opravách.

Pro svařovací metodu 111 byl zvolen přídatný materiál obchodního značení OK 73.68 dle normy ČSN EN ISO 2560. Je to bazická elektroda Ni, pro svařování konstrukčních a nízkolegovaných ocelí s dobrou odolností proti křehkému lomu. Má dobrou ovladatelnost ve všech svařovacích polohách. Svarový kov odolává korozi. Používá se pro svařování jemnozrnných ocelí. Při velkých tloušťkách a nízkých teplotách se doporučuje přehřev cca 100 °C. Obsah difuzního vodíku je menší než 5 ml/100g svarového kovu. Teplota přesušení je 100 °C/1h+250 až 350 °C/2 h. Svařovací parametry: proud (I)= 105-150 A, napětí (U)= 23 V [8].

Chemické složení čistého svarového kovu a mechanické vlastnosti svarového kovu elektrody OK 73.68 jsou uvedeny v tabulkách 3.3.1 a 3.3.2.

Tab. 3.3.1 Chemické složení čistého svarového kovu v hm% [8]

C	Mn	Si	Ni
0,05	1,0	0,35	2,40

Tab. 3.3.2 Mechanické hodnoty čistého svarového kovu [8]

podmínky	stav	R _m [MPa]	R _e [MPa]	A ₅ [%]	KV [J]/-55°C
ISO	po svařování	610	520	26	110
ISO	po žíhání	600	500	28	90

Svářečské práce byly provedeny kvalifikovaným svářečem dle normy ČSN EN 287 – 1.

3.4 Provedení experimentálního svařování

- Elektrody OK 73.68, \varnothing 3,2 mm, byly vyjmuty z obalu a sušeny jednu hodinu při teplotě 100 °C a pak po dobu dvou hodin při teplotě 300 °C. Přesušené elektrody byly uloženy do izolačního pouzdra, aby bylo zabráněno pohlcování vlhkosti.
- Vyfrézované drážky se svařovaly v poloze svařování shora. Symbol svařování PA dle ČSN EN ISO 6947.
- Bylo provedeno zarovnání převýšení svarů přebroušením a provedeny nedestruktivní kontroly před indukčním lokálním tepelným zpracováním.
- Svary číslo 2 a 3.1 byly vyřazeny z důvodu výskytu studeného spoje a strusky ve svarovém kovu.
- Zavařená experimentální deska byla dle výkresové dokumentace rozřezaná na mechanické pile. Označení svarů 1, 2, 3, 1.1, 2.1 a 3.1 dle výkresu viz příloha 1.
- Rozřezané bloky byly převezeny ven před halu, kde po indukčním lokálním tepelném zpracování dojde pozvolna k ochlazení.

4 NÁVRH TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

V rámci experimentu bylo provedeno indukční lokální tepelné zpracování svarových spojů s překrytí, normalizační žíhání.

Lokální tepelné zpracování bylo provedeno pomocí indukčního přístroje MINAC 40/80 [9]. Přístroj byl zvolen pro jeho dostupnost a mobilitu. Detail přístroje je uveden na obrázku 4: Indukční přístroj MINAC 40/80.



Obr. 4 Indukční přístroj MINAC 40/80 [9]

Základní technická data přístroje MINAC 50/80 [9]:

- | | | |
|-------------------------------|---|----------------------|
| • Trvalý výstupní výkon | – | 50 kW |
| • Max. výstupní výkon | – | 80 kW |
| • Zatížitelnost / doba cyklu | – | 50% / 10 minut |
| • Frekvenční rozsah | – | 10 - 40 kHz |
| • Rozsah napájecího napětí | – | 3x 400 - 480 V + 10% |
| • Jmenovitý proud | – | 90 A |
| • Max. síťový proud při 360 V | – | 144 A |
| • Jmenovitý zdánlivý výkon | – | 62 kVA |
| • Maximální zdánlivý výkon | – | 88 kVA |

4.1 Návrh režimů indukčního lokálního tepelného zpracování

Pro experimentální indukční lokální tepelné zpracování jsou připraveny označené svary, viz tabulka 4.1. Provedení experimentu bylo kontrolováno ručním infračerveným pyrometrem a byla naměřena teplota cca 900 °C.

Označené svary číslo 2 a 3 nevyhověly nedestruktivní kontrole po svařování. Byly vyřazeny z důvodu výskytu vad (studený spoj, struska) na povrchu svaru.

Svar číslo 2.1 zůstane tepelně nezpracovaný. Bude sloužit k porovnání s ostatními tepelně zpracovanými vzorky.

Tab. 4.1 Rozdělení označených svarů pro tepelné zpracování (TZ)

číslo svaru	nedestruktivní kontrola	TZ	sekce	režim TZ	čas výdrže	dobu zchlazování
1	vyhovuje	ano	4x	ze 40-20 % výkonu	12 minut	pozdvolna v izolačním zábalu
2	nevyhovuje	/	/	/	/	/
3	vyhovuje	ano	4x	ze 40-20 % výkonu	20 minut	pozdvolna v izolačním zábalu
1.1	vyhovuje	ano	ne	ze 40-20 % výkonu	12 minut	pozdvolna v izolačním zábalu
2.1	vyhovuje	ne	ne	ne	ne	Ne
3.1	nevyhovuje	/	/	/	/	/

Jednotlivé režimy indukčního lokálního tepelného zpracování jsou na základě zkušeností techniků provozu předem stanoveny. Výkon tepelného zpracování je navržen v procentech.

Režim indukčního lokálního tepelného zpracování pro:

- svarový spoj číslo 1 je navržen 40-20% -12 minut. Znamená to, že výkon po přiložení indukční spirály klesá po dobu 12 minut ze 40 % výkonu na 20 % výkonu v daných čtyřech sekcích svarového spoje číslo 1 postupně. Následuje pozvolné chladnutí v izolačním zábalu.
- svarový spoj číslo 1.1 je navržen 40-20 % -12 minut. Výkon po přiložení indukční spirály klesá po dobu 12 minut ze 40 % výkonu na 20 % výkonu. Zde je svarový spoj zpracováván rozkyvem po celé délce svarového spoje číslo 1.1. Následuje pozvolné chladnutí v izolačním zábalu.
- svarový spoj číslo 3 je navržen 40-20 % -20 minut. Znamená to, že výkon po přiložení indukční spirály klesá po dobu 20 minut ze 40 % výkonu na 20 % výkonu ve čtyřech sekcích svarového spoje číslo 3 postupně. Následuje pozvolné chladnutí v izolačním zábalu.

4.2 Provedení postupu indukčního lokálního tepelného zpracování

- Vyhovující označené svary 1, 1.1 a 3 pro indukční lokální tepelné zpracování byly očištěny, přebroušeny a připraveny ve venkovním prostředí k experimentu.
- Mobilní indukční přístroj MINAC 40/80 byl postupně nastaven na požadované režimy a přiložením indukční spirály bylo provedeno žíhání.
- Svar číslo 2.1 nebyl lokálně tepelně zpracován a bude sloužit pro porovnání mezi tepelně zpracovanou a tepelně nezpracovanou variantou.
- Svar číslo 1.1 byl lokálně tepelně zpracován rozkyvem po celé délce. Bude reprezentovat změnu vlastností oceli při nedůkladném a urychleném tepelném zpracování.
- Svary 1 a 3 byly rozděleny na čtyři sekce po cca 80 mm, viz obr. 4.2. Každá sekce byla lokálně tepelně zpracována daným režimem postupně (tzn. každý svar 4x - postupně na celé délce).
- Svarové spoje po indukčním lokálním tepelném zpracování jsou povolna vychlazovány v izolačním zábalu.
- Mechanicky odebrané jednotlivé vzorky byly označeny a identifikovány viz příloha 2. Byly odeslány spolu se zkušebním listem do akreditované zkušebny na provedení zadaných destruktivních zkoušek.



Obr. 4.2 Indukční lokální tepelné zpracování svarového spoje

5 NÁVRH ZKOUŠEK MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SVAROVÉHO KOVU

Mechanické vlastnosti svarových kovů jsou ovlivněny chemickým složením, způsobem krystalizace, mikrostrukturou, velikostí zrn, precipitačními procesy a stárnutím. Při studii mechanických vlastností svarového spoje ve srovnání s vlastnostmi základního materiálu můžeme vycházet také ze vzorců [1]:

$$R_s \text{ svarový kov} = 1,1 \text{ až } 1,3 R_s \text{ zákl. materiál} \quad (4.1)$$

$$R_m \text{ svarový kov} = 0,9 \text{ až } 1,2 R_m \text{ zákl. materiál} \quad (4.2)$$

5.1 Popis destruktivních zkoušek mechanických vlastností svarového spoje

Pro bezpečný provoz svařovaných výrobků je důležité zkoušet a dokladovat i mechanické vlastnosti svarových spojů. Při zkoušení mechanických vlastností, například zkoušky tahem, se výrobek poruší. Proto se tyto zkoušky provádí na zkušebních vzorcích při schvalování postupu svařování podle příslušných norem. Mezi destruktivní zkoušky mechanických vlastností svarového spoje patří také požadované zkoušky rázem v ohybu, zkoušky tahové, zkoušky makro a mikrostruktury a zkoušky tvrdosti na povrchu a v řezu.

- Zkouška tvrdosti podle Vickerse se provádí podle ČSN EN ISO 9015-1 a ČSN ISO 6507-1.
- Zkouška rázem v ohybu za normální teploty se provádí podle norem ČSN ISO 148-1 a ČSN EN ISO 9016.
- Příčná zkouška tahem se provádí podle normy ČSN EN ISO 6892-1, ČSN EN ISO 4136 a ČSN EN ISO 5171.
- Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů se provádí podle ČSN EN 1321 a ČSN EN ISO 15614-1.

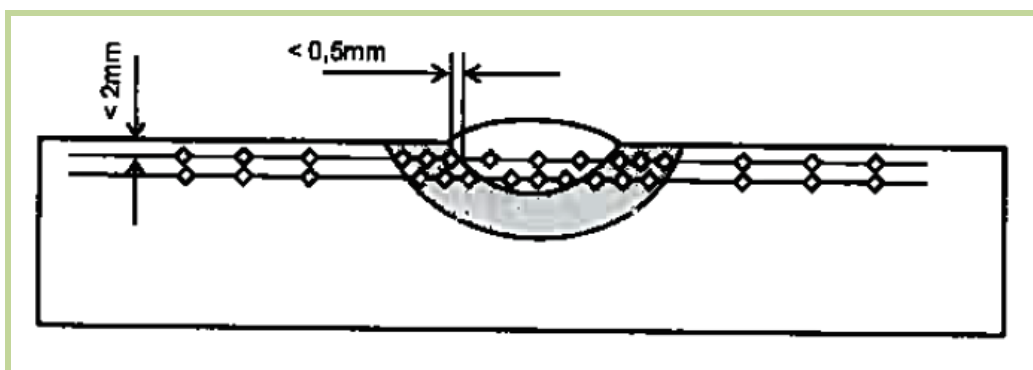
5.1.1 Zkoušky tvrdosti svarového spoje

Zkouška tvrdosti svarového spoje podle Vickerse HV 10 byla provedena v souladu s ČSN EN ISO 15614-1, čl. 7.4.6 a dle ČSN EN ISO 9015-1. Teplota okolního prostředí při provádění zkoušky byla 20 °C.

Po odebrání se povrch vzorku upravil broušením i leptáním, po kterém došlo k zviditelnění jednotlivých oblastí svarového spoje. Účelem je rozeznat a zkoumat základní materiál, svarový kov a tepelně ovlivněnou oblast.

Odebrané vzorky pro zkoušku tvrdosti jsou označeny 1/M1 ,1/M2, 1.1/M1, 1.1/M2, 2.1/M1, 2.1/M1, 3/M1 a 3/M2. Rozpis vzorků je uveden v přílohách 4, 6, 8 a 10.

Rozmístění vtisků na vzorku k určení oblastí s různými úrovněmi tvrdosti jsou provedeny ve dvou osách podle obrázku 5.1.1.



Obr. 5.1.1 Rozmístění vtisku pro měření tvrdosti HV 10

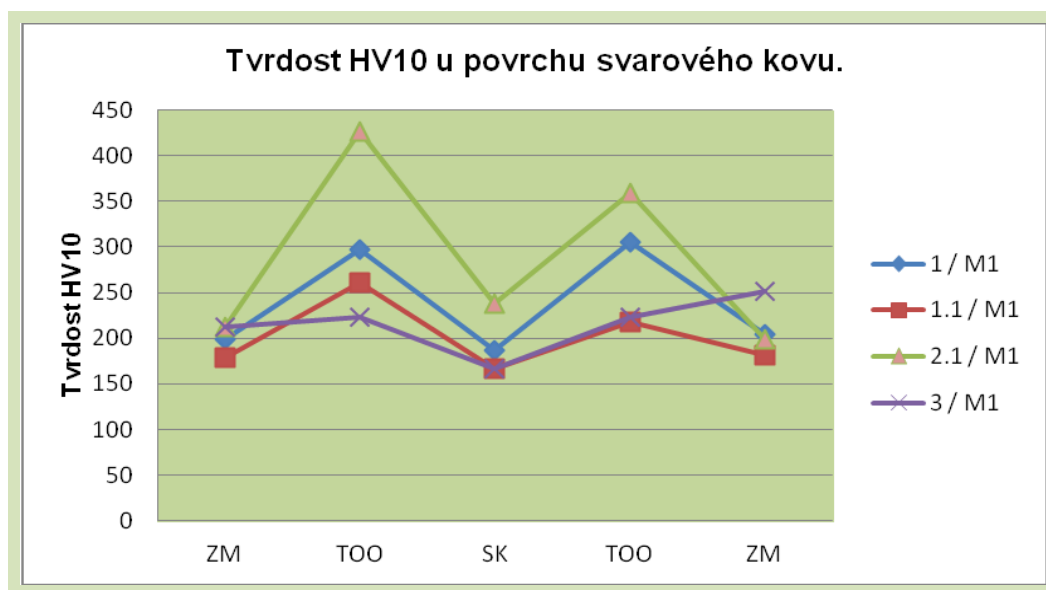
Provedení zkoušky tvrdosti svarového spoje.

Měření tvrdosti podle Vickerse HV 10 vzorků svarových spojů probíhalo v akreditované zkušebně mechanických vlastností v souladu s normou ČSN EN ISO 15614-1, čl. 7.4.6 a ČSN EN ISO 9015-1. Výsledky z výsledných protokolů (viz příloha 4, 6, 8 a 10) jsou uvedeny v tabulkách 5.1.1 a 5.1.2. Graficky jsou znázorněny v grafech 5.1.1 a 5.1.2.

Vzorek 2.1/M1 je tepelně nezpracovaný. Slouží k porovnání s ostatními tepelně zpracovanými vzorky.

Tab. 5.1.1 Tvrdost svarových zkoušek u povrchu svarového kovu

TVRDOST HV 10 / vzorek	1/M1	1.1/M1	2.1/M1	3/M1
max. hodnoty tvrdosti v ZM	199	178	213	213
max. hodnoty tvrdosti v TOO	297	261	427	223
max. hodnoty tvrdosti v SK	187	167	238	166
max. hodnoty tvrdosti v TOO	305	218	359	223
max. hodnoty tvrdosti v ZM	204	181	199	251



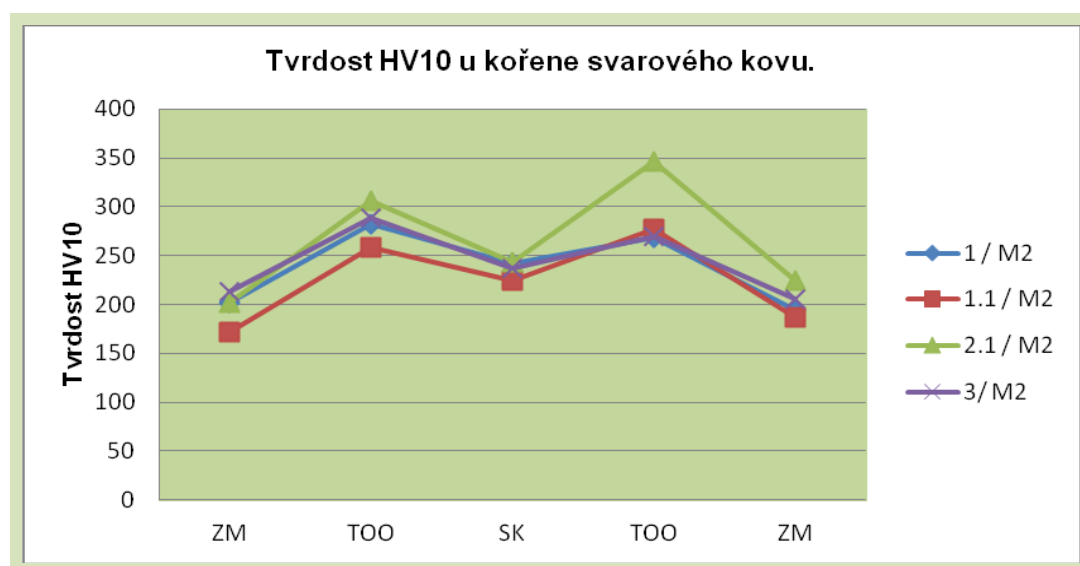
Graf 5.1.1 Tvrdost HV 10 u povrchu svarového kovu

Z parametrů uvedených v tabulce a vykreslených v příslušném grafu je zřejmé, že tvrdost u povrchu svarového kovu je u všech vzorků nižší v oblastech TOO i SK v porovnání s tvrdostí tepelně nezpracovaného vzorku (2.1/M1).

Tab. 5.1.2 Tvrdost svarových zkoušek u kořene svarového kovu

TVRDOST HV 10 / vzorek	1/M2	1.1/M2	2.1/M2	3/M2
max. hodnoty tvrdosti v ZM	202	172	202	213
max. hodnoty tvrdosti v TOO	282	258	306	288
max. hodnoty tvrdosti v SK	242	225	243	237
max. hodnoty tvrdosti v TOO	269	277	346	270
max. hodnoty tvrdosti v ZM	194	187	225	206

Vzorek 2.1/M2 je tepelně nezpracovaný. Slouží k porovnání s ostatními tepelně zpracovanými vzorky.



Graf 5.1.2 Tvrdost HV 10 u kořene svarového kovu

Experimentální ocel GS24Mn6 náleží podle TNI CEN ISO/TR 15608:2008 do skupiny 1.3.

V normě pro kvalifikaci postupů ve svařování ČSN EN ISO 15614-1 je uvedena maximální přípustná hodnota tvrdosti. Pro ocel GS24Mn6 se uvádí maximální přípustná hodnota tvrdosti, tam kde je zkouška tvrdosti požadovaná, u vícevrstvých svarů tepelně zpracované 320 HV 10 a tepelně nezpracované 380 HV 10. Pokud není jinak stanoveno požadavky zákazníka [5].

Maximální naměřená hodnota u povrchu svarového kovu po tepelném zpracování je 305 HV 10 u vzorku 1/M1. U kořene svarového spoje je maximální hodnota 288 HV 10 u vzorku 3/M2.

Průměrně nejmenší tvrdost byla naměřena u vzorku režimu indukčního lokálního tepelného zpracování pro svarový spoj 1.1.

Tvrdost zkoumaných svarových spojů je dle normy ČSN EN ISO 15614-1, čl. 7.4.6 pro všechny varianty tepelného zpracování vyhovující [5].

5.1.2 Zkoušky rázem v ohybu

Houževnatost materiálu udává jeho odolnost proti křehkému lomu. Pro zjištění stavu křehkosti zkoumaného materiálu je při zkouškách nárazové práce důležitá i teplota zkoumaného materiálu.

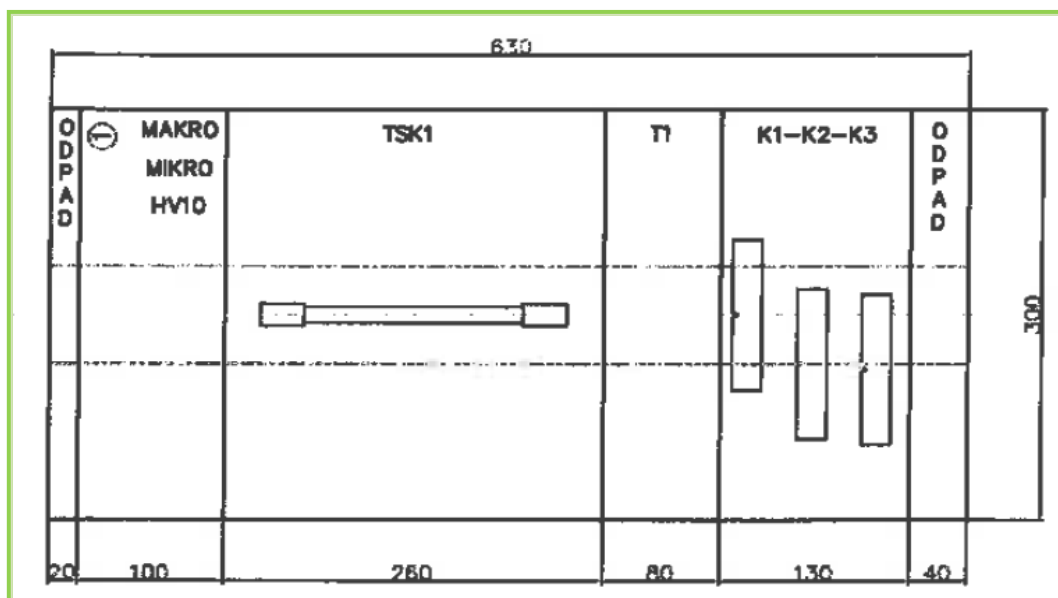
Vzhledem k vysoké houževnatosti oceli se opatřuje zkušební vzorek vrubem. Pro snadnější umístění vrubu ve svarovém spoji se může řez svarového spoje naleptat za účelem přesného umístění vrubu v požadované oblasti svarového spoje.

Zkoušky rázem v ohybu zkušebních svarových spojů se provádí podle normy ČSN ISO 148-1. Výběr míst a značení vzorků pro umístění vrubu ve zkušebním vzorku udává norma ČSN EN 10045-1, pro vrub tvaru V.

Pomocí nárazového kyvadlového kladiva (Charpyho) se zkušební tyč přerazí. Zkouška končí destrukcí zkušebního vzorku a následně se vyhodnotí údaje (nárazová práce). Hodnoty nárazové práce, nebo vrubové houževnatosti musí odpovídat požadavkům výrobních norem, průřezových norem, nebo jiných technických předpisů, které byly stanoveny mezi odběratelem a zákazníkem.

Provedení zkoušky rázem v ohybu.

Zkouška rázem v ohybu byla provedena dle ČSN ISO 148-1 při teplotě +20 °C. Maximální energie použitého kladiva je 300 J. Vzorky byly odebrány dle normy ČSN EN 10045-1, ISO V ze středu svarového kovu, z hranice ztavení svarového kovu a 2 mm od hranice ztavení viz obrázek 5.1.2.



Obr. 5.1.2 Výřez rozřezového plánu destruktivních zkoušek [příloha 2]

Odebrané vzorky pro zkoušky rázem v ohybu jsou označeny 1/K1, 1/K2, 1/K3, 1.1/K37, 1.1/K38, 1.1/K39, 2.1/K40, 2.1/K41, 2.1/K42, 3/K7, 3/K8 a 3/K9. Rozpis vzorků zkoušek rázem v ohybu je uveden v příloze 2.

Výsledky zkoušek rázem v ohybu z výsledných protokolů, jejichž kopie jsou součástí příloh 4, 6, 8 a 10, jsou uvedeny v tabulce 5.1.3.

Tab. 5.1.3 Parametry zkoušek rázem v ohybu

číslo svaru/označení vzorku	zkušební teplota [°C]	místo odebrání vzorku	nárazová práce [J]
1 / K1	+20	střed svarového kovu	82
1 / K2	+20	hranice ztavení	126
1 / K3	+20	2 mm od hranice ztavení	134
1.1 / K37	+20	střed svarového kovu	179
1.1 / K38	+20	hranice ztavení	160
1.1 / K39	+20	2 mm od hranice ztavení	150
2.1 / K40	+20	střed svarového kovu	162
2.1 / K41	+20	hranice ztavení	174
2.1 / K42	+20	2 mm od hranice ztavení	162
3 / K7	+20	střed svarového kovu	146
3 / K8	+20	hranice ztavení	150
3 / K9	+20	2 mm od hranice ztavení	165

Vzorky s číslem svaru 2.1 nebyly následně po svařování tepelně zpracovány. Slouží k porovnání s ostatními tepelně zpracovanými vzorky.

Nejnižší naměřená hodnota nárazové práce je u vzorku 1/K1 a je ze středu svarového kovu $KV = 82 \text{ J}$. Nejvyšší naměřená hodnota nárazové práce je u vzorku 1.1/K37 a je ze středu svarového kovu $KV = 179 \text{ J}$.

5.1.3 Příčná zkouška tahem

Mez pevnosti tupých svarových spojů a poloha lomu se zjišťuje pomocí příčné zkoušky tahem, kdy zkušební tyč je odebíraná kolmo na osu svarového spoje. Pro stanovení mechanických vlastností svarového kovu se používají zkušební tyče odebírané z čistého svarového kovu, ve směru jeho osy [2].

Při zkouškách v tahu postupujeme podle norem ČSN EN 10002-1 a ČSN EN ISO 6892 – 1. Stanovují se rozměry zkušebních tyčí, způsob jejich odběrů a jejich zpracování. Zkušební tyče jsou odebrány po předepsaném tepelném zpracování. Při mechanickém dělení a odebírání zkušebních tyčí nesmí v žádném případě metoda dělení ovlivnit vlastnosti zkušební tyče.

Tahovou zkouškou se zjišťují tyto mechanické vlastnosti svarového spoje: mez kluzu R_e [MPa], mez pevnosti R_m [MPa], tažnost A [%] a kontrakce Z [%].

Provedení zkoušky tahem.

Každá zkušební tyč odebraná ze svarového spoje byla pečlivě označena a zaznamenána, aby bylo možné určit její přesnou polohu ve svarovém spoji.

Odebrané vzorky pro zkoušku tahem jsou označeny T1A, T1B, TSK1, T7A, T7B, TSK/1.1, T8A, T8B, TSK/2.1, T3A, T3B a TSK3. Rozpis označení je uveden v rozřezovém plánu číslo 01/12 (viz příloha 2). Výsledky z výsledných protokolů (viz přílohy 4, 6, 8 a 10) jsou uvedeny v tabulce 5.1.4.

Tab. 5.1.4 Parametry zkoušky tahem

označení vzorků	místo zkoušky	číslo svaru	R_e [MPa]	R_m / místo přerušení [MPa/-]	A [%]	Z [%]
T1A T1B TSK1	svarový spoj svarový spoj svarový kov	1	461	552 / ve svaru 632 / ve svaru 546	20,2	73
T7A T7B TSK/1.1	svarový spoj svarový spoj svarový kov	1.1	604	633 / ve svaru 662 / mimo svar 642	24,2	68,6
T8A T8B TSK/2.1	svarový spoj svarový spoj svarový kov	2.1	604	648 / ve svaru 646 / mimo svar 652	22,8	74
T3A T3B TSK3	svarový spoj svarový spoj svarový kov	3	410	555 / ve svaru 641 / mimo svar 560	25,4	73

Vzorky s číslem svaru 2.1 nebyly následně po svařování tepelně zpracovány. Slouží k porovnání s ostatními tepelně zpracovanými vzorky.

Došlo k přerušení ve svaru u vzorku T1A, T1B, T7A, T8A, T3A a k přerušení mimo oblast svaru u vzorků T7B, T8B a T3B.

Naměřené hodnoty meze pevnosti R_m porovnáváme s hodnotami nežíhaného materiálu. Z tabulky 5.1.4 je zřejmé, že pevnost svarových spojů po tepelném zpracování je u většiny vzorků nižší než pevnost svarového spoje tepelně nezpracovaného číslo 2. 1.

Při porovnání naměřených hodnot viz tabulka 5.1.4 s mechanickými hodnotami oceli GS24Mn6 viz kapitola 3.1, tabulka 3.1.2 zjišťujeme, že se hodnoty meze pevnosti R_m shodují s hodnotami vzorku svarového spoje číslo 1.1. Hodnoty meze kluzu R_e u vzorků pro svarový spoj číslo 1 a 3 jsou podobné s mechanickými hodnotami oceli GS24Mn6. Hodnoty tažnosti A_5 oceli GS24Mn6 jsou téměř shodné s hodnotami vzorku pro svarový spoj číslo 1.1.

5.1.4 Zkoušky makro a mikrostruktury svarového spoje

Zkouška makrostruktury patří mezi zkoušky metalografické, které doplňují údaje získané zkouškami mechanických vlastností. Ověřují stav struktury materiálu, tedy v našem případě svarových spojů.

U makrostruktury sledujeme povrch pouhým okem, nebo se případně používají lupy a určují se vady typu studených spojů nebo vměstků, dále spojení jednotlivých svarových housenek a tepelně ovlivněná oblast.

Mikrostruktura se ověřuje pomocí optického nebo elektronového mikroskopu, protože se pracuje s většími zvětšeními a pozorují se jednotlivá zrna materiálu, hranice zrn, strukturní složky materiálu svaru a tepelně ovlivněná oblast.

Důležitou částí metalografických zkoušek je dokonalá příprava zkušebních vzorků. Příprava spočívá v mechanickém oddělení, které zároveň nesmí nijak ovlivnit strukturu materiálu, poté opracování a postupným vytvářením povrchu. Vhodný povrch se docílí broušením na metalografických papírech, u kterých se postupně snižuje hrubost zrn. Následně se povrch leští elektronicky, nebo mechanicky. Používají se buď elektrolytické postupy, nebo pasty například s diamantovým prachem.

U zkoušky makrostruktury používáme pro získání požadovaného povrchu činidla, která vyvolají zvýraznění makrostruktury. Nejčastěji se používají leptadla. Jsou to vodní roztoky kyseliny dusičné, nebo persíranu amonného. Výsledné povrchy se většinou fotografují pro možnost uchování a případnou reprodukci [2].

Provedení zkoušky makroskopické a mikroskopické kontroly svarů.

Vzorky pro makroskopickou a mikroskopickou kontrolu svarů jsou označeny 1/M, 1.1/M, 2.1/M a 3/M (vzorky se následně využily pro zkoušku měření tvrdosti). Označení vzorků je uvedeno v přílohách 3, 5, 7 a 9.

Vzorky s číslem svaru 2.1 nebyly následně po svařování tepelně zpracovány. Slouží k porovnání s ostatními tepelně zpracovanými vzorky.

Pro zkoušku makrostruktury byl povrch zkušebních vzorků svaru naleptán 15% HNO₃ a jedenkrát zvětšen. Hodnoty výsledků zkoušek makrostruktury jsou uvedeny v tabulce 5.1.5.

Tab. 5.1.5 Výsledky zkoušek makrostruktury svarového spoje

svar/ označení	makrostruktura	šířka TOO
1/M	bez vad.	max. 17,0 mm
1.1/M	bez vad	max. 5,0 mm
2.1/M	bez vad	max. 2,5 mm
3/M	bez vad	max. 22,0 mm

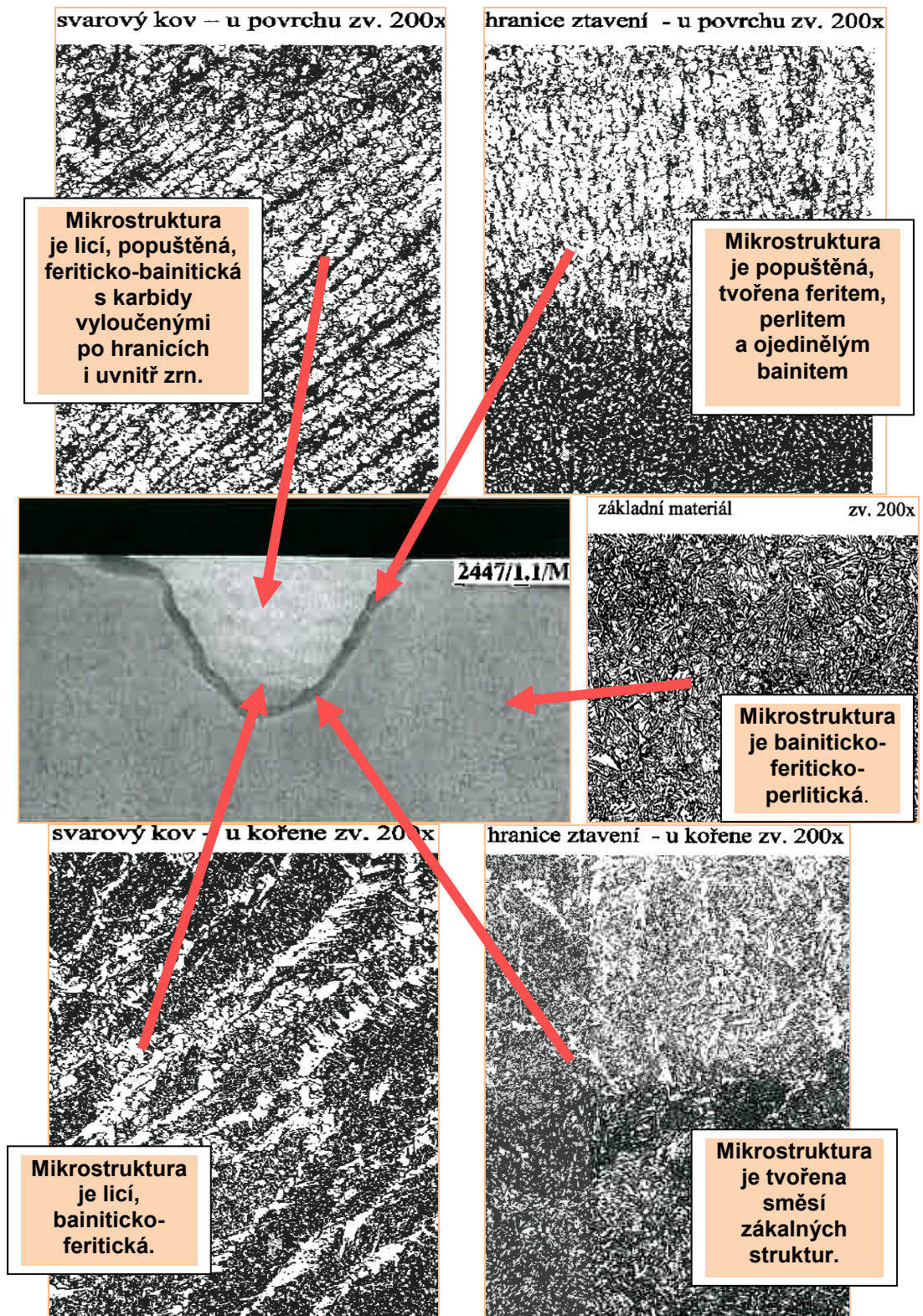
Dle ČSN EN ISO 15614-1 odstavce 7.4.3 nebyly zjištěny u uvedených vzorků žádné nepřípustné vady [5].

Pro zkoušku mikrostruktury byl povrch zkušebních vzorků svaru naleptán 4% HNO_3 a 200x zvětšen.

Byly pořízeny snímky z obou tepelně ovlivněných oblastí, svarového kovu a základního materiálu. Snímky všech vzorků jsou přiloženy k bakalářské práci (viz příloha 3, 5, 7 a 9).

U všech zkoumaných vzorků je mikrostruktura svarového kovu u povrchu licí, popuštěná, feriticko-bainitická s karbidy vyloučenými po hranicích i uvnitř zrn. Mikrostruktura teplem ovlivněné oblasti u hranice ztavení u povrchu je popuštěná, tvořena feritem, perlitem a ojedinělým bainitem. Mikrostruktura svarového kovu u kořene je licí, bainiticko-feritická. Mikrostruktura teplem ovlivněné oblasti u hranice ztavení u kořene je tvořena směsí základních struktur. Mikrostruktura základního materiálu je popuštěná, bainiticko-feriticko-perlitická.

Na obrázku 5.1.4 jsou pro názornost uvedeny fotografie z jednotlivých oblastí tepelně ovlivněného spoje vzorku číslo 1.1/M. Ostatní vzorky jsou dokumentovány v přílohách číslo 3, 7 a 9.



Obr. 5.1.4 Makrostruktura a mikrostruktura svarového spoje (vzorek číslo 1.1/M)

6 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Úkolem experimentu bylo vyhodnotit nejpříznivější režim indukčního lokálního tepelného zpracování tak, aby se docílilo podobných vlastností u základního nesvařovaného materiálu a svarového spoje.

Zkoumání změn mechanických vlastností svarového spoje lokálně tepelně zpracovaného různými režimy žíhání bylo provedeno u zadaných destruktivních zkoušek.

Z destruktivních zkoušek byla jako první popsána zkouška tvrdosti. Zkoumala se tvrdost HV 10 u povrchu svarového kovu a u kořene svarového spoje.

- Nejvyšší naměřená hodnota u povrchu svarového kovu po indukčním lokálním tepelném zpracování je 305 HV 10 u vzorku režimu tepelného zpracování pro svarový spoj číslo 1.
- U kořene svarového spoje po indukčním lokálním tepelném zpracování je nejvyšší naměřená hodnota 288 HV 10 u vzorku režimu tepelného zpracování pro svarový spoj číslo 3.
- Průměrně nejmenší tvrdost byla naměřena u vzorku režimu tepelného zpracování pro svarový spoj číslo 1.1.

Protože chceme svarový spoj lokálně tepelně zpracovat s odstraněním vysokých hodnot tvrdosti a snížit také tvrdost svarových spojů, dá se považovat zkouška tvrdosti zkoumaných svarových spojů za vyhovující.

Další vyhodnocování mechanických hodnot proběhlo u destruktivní zkoušky rázem v ohybu.

- Nejnižší naměřená hodnota nárazové práce je u vzorku 1/K1 a je ze středu svarového kovu $KV = 82 \text{ J}$.
- Nejvyšší naměřená hodnota nárazové práce je u vzorku 1.1/K37 a je ze středu svarového kovu $KV = 179 \text{ J}$.

U zkoušky tahem došlo k přerušení ve svaru u vzorku T1A, T1B, T7A, T8A, T3A a k přerušení mimo oblast svaru u vzorků T7B, T8B a T3B.

- Hodnota meze kluzu R_e zůstala u vzorku svarového spoje číslo 1.1 stejná, jako u tepelně nezpracovaného vzorku číslo 2.1
- Hodnoty meze kluzu R_e u vzorků pro svarový spoj číslo 1 a 3 jsou podobné s mechanickými hodnotami oceli GS24Mn6.
- Naměřené hodnoty meze pevnosti R_m svarových spojů po tepelném zpracování jsou u většiny vzorků nižší než pevnost svarového spoje tepelně nezpracovaného číslo 2.1.
- Hodnoty meze pevnosti R_m oceli GS24Mn6 se shodují s hodnotami vzorku svarového spoje číslo 1.1.
- Hodnoty tažnosti A_5 oceli GS24Mn6 jsou téměř shodné s hodnotami vzorku pro svarový spoj číslo 1.1.

Poslední v této práci popsaná destruktivní zkouška byla zkouška makro a mikrostruktury.

- U zkoušek makrostruktury všech vzorků nebyly zjištěny žádné nepřípustné vady.
- Zkouška mikrostruktury prokázala, že proběhly podobné změny mikrostruktury u všech tepelně zpracovaných i tepelně nezpracovaných vzorků svarového spoje.

6.1 Návrh optimálního režimu indukčního lokálního tepelného zpracování

Aby bylo možno zaručit přípustné mechanické vlastnosti na opravovaných místech a jejich bezprostředním okolí, navrhuji režim indukčního lokálního tepelného zpracování pro svarový spoj číslo 1.1. Pro tento svarový spoj byl indukční přístroj MINAC 40/80 nastaven na režim, při kterém po přiložení indukční spirály přístroje klesá výkon po dobu 12 minut ze 40 % výkonu na 20 % výkonu přístroje. Svarový spoj číslo 1.1 je při něm zpracováván rozkyvem po celé své délce. Ručním infračerveným pyrometrem byla v průběhu zpracovávání naměřena teplota cca 900 °C. Následuje volné chladnutí v izolačním zábalu.

Zdůvodnění a potvrzení návrhu:

- průměrně nejmenší tvrdost byla naměřena u vzorků režimu tepelného zpracování pro svarový spoj číslo 1.1.
- u výsledků zkoušek rázem v ohybu projevovaly hodnoty vzorků svarového spoje číslo 1.1 v porovnání s tepelně nezpracovanými vzorky svarového spoje číslo 2.1 téměř shodné výsledky.
- u zkoušky tahem došlo k porušení ve svaru a k porušení mimo oblast svaru u vzorku pro svarový spoj číslo 1.1 stejně jako u tepelně nezpracovaného vzorku. Hodnota meze kluzu zůstala u vzorku pro svarový spoj číslo 1.1 stejná jako u tepelně nezpracovaného vzorku pro svarový spoj číslo 2.1. Hodnoty tažnosti A_5 nesvařované oceli experimentální desky jsou téměř shodné s hodnotami vzorku pro svarový spoj číslo 1.1. Hodnoty meze pevnosti R_m nesvařované oceli experimentální desky se shodují s hodnotami vzorku svarového spoje číslo 1.1.
- u zkoušek makrostruktury vzorku svarového spoje číslo 1.1 nebyly zjištěny žádné nepřípustné vady. Zkouška mikrostruktury u vzorku číslo 1.1 svarového spoje po tepelném zpracování, prokázala podobnou změnu struktury jako u tepelně nezpracovaného vzorku číslo 2.1.

Jednoznačně režim tepelného zpracování určený pro svarový spoj 1.1 vyhovuje normám a mechanické hodnoty vzorků tímto režimem zpracované oceli jsou téměř totožné se vzorky základního materiálu.

ZÁVĚR

V úvodu mé bakalářské práce je popsán konkrétní problém oprav na površích velkorozměrových odlitků ve strojírenském průmyslu. Cílem experimentu bylo zkoumat a následně vyhodnotit optimální režim tepelného zpracování na odstranění nežádoucích změn při těchto opravách.

V teoretické části je vysvětlen pojem uhlíkovo-manganová ocel a popsány její základní parametry, pojem svařitelnosti C-Mn ocelí, pojem prvků ovlivňujících svařitelnost C-Mn ocelí, náchylnost na vznik trhlin, přehřev a dohřev C-Mn ocelí. Zkoumání vlivu chemických vlastností C-Mn ocelí mě přivedlo k závěru, že konstrukční C-Mn oceli jsou dobře svařitelné, nejsou náchylné na vznik trhlin.

V praktické části je pro simulaci odstranění vad rozměrově velkého odlitku z C-Mn oceli představena experimentální deska, navržena metoda svařování, různé režimy indukčního lokálního tepelného zpracování svarového spoje, sledování a vyhodnocení zadaných destruktivních zkoušek. Výsledky destruktivních zkoušek jsou jednotlivě popsány a výsledné hodnoty zaznamenány do přehledných tabulek a grafů. Je vyhodnocen optimální režim indukčního lokálního tepelného zpracování.

Pro tepelné zpracování po opravě svařováním, volím režim lokálního tepelného zpracování rozkyvem 12 minut ze 40 % výkonu na 20 % výkonu indukčního přístroje MINAC 40/80, který byl aplikován na svarovém spoji číslo 1.1 a dosáhlo se při něm optimálních mechanických vlastností svarového spoje. Mechanické vlastnosti byly nejvíce podobné materiálu svarového kovu bez tepelného zpracování a nesvařovaného základního materiálu experimentální desky.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. [Materiály a jejich svařitelnost]. Vydání 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [2] KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. [Svařování I]. Vydání 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.
- [3] FREMUNT, Přemysl; PODRÁBSKÝ, Tomáš. [Konstrukční oceli]. Vydání 1. Brno: Cerm, s.r.o., 1996. 267 s. ISBN 80-85867-96-8.
- [4] VOJTĚCH D.: [Kovové materiály]. 1.vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [5] Česká Republika. Česká technická norma: Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část I: Obloukové a plamenné svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu. ČSN EN ISO 15614-1:2004. Dostupný také z WWW:< <http://csnonline.unmz.cz/vyhledavani.aspx>>.
- [6] Bednář, B. - Šanovec, J. - Čermák, J. - Michálek, L.: [Technologičnost konstrukce I]. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 146 s. ISBN 80-01-03268-X.
- [7] Česká Republika. Česká technická norma: Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí, ČSN EN 1011-2. Dostupný také z WWW:< <http://csnonline.unmz.cz/vyhledavani.aspx>>.
- [8] Katalog přídatných materiálů ESAB, dostupný z WWW:< <http://www.esab.cz>>.
- [9] Popis a technické parametry přístroje MINAC 50/80, dostupné z WWW:< <http://www.efd-induction.com>>.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Závislost tažnosti a pevnosti [3]
Obr. 2.2.1 Vliv uhlíku na mechanické vlastnosti [3]
Obr. 2.3 Režim tepelného zpracování [2]
Obr. 3.2 Experimentální deska připravená k svařování
Obr. 4 Indukční přístroj MINAC 40/80 [9]
Obr. 4.2 Indukční lokální tepelné zpracování svarového spoje
Obr. 5.1.1 Rozmístění vtisku pro měření tvrdosti HV 10
Obr. 5.1.2 Výřez rozřezového plánu destruktivních zkoušek [příloha 2]
Obr. 5.1.4 Makrostruktura a mikrostruktura svarového spoje (vzorek číslo 1.1/M)

Seznam tabulek

Tab. 3.1.1 Chemické složení GS24Mn6 v hm. %
Tab. 3.1.2 Mechanické hodnoty GS24Mn6
Tab. 3.3.1 Chemické složení čistého svarového kovu v hm% [8]
Tab. 3.3.2 Mechanické hodnoty čistého svarového kovu [8]
Tab. 4.1 Rozdělení označených svarů pro tepelné zpracování (TZ)
Tab. 5.1.1 Tvrdost svarových zkoušek u povrchu svarového kovu
Tab. 5.1.2 Tvrdost svarových zkoušek u kořene svarového kovu
Tab. 5.1.3 Parametry zkoušek rázem v ohybu
Tab. 5.1.4 Parametry zkoušky tahem
Tab. 5.1.5 Výsledky zkoušek makrostruktury svarového spoje

Seznam grafů

Graf 5.1.1 Tvrdost HV 10 u povrchu svarového kovu
Graf 5.1.2 Tvrdost HV 10 u kořene svarového kovu

9 SEZNAM PŘÍLOH

Seznam příloh

Příloha 1	Výkres č. 3-ET-012160-Experimentální deska, počet listů-1
Příloha 2	Rozřezový plán č.: 01/12, počet listů-1
Příloha 3	Protokol o zkoušení (1) č. P/1526/12, počet listů-5
Příloha 4	Protokol o zkoušení (1) č. 267L12, počet listů-2
Příloha 5	Protokol o zkoušení (1.1) č. P/1527/12, počet listů-5
Příloha 6	Protokol o zkoušení (1.1) č. 262L12, počet listů-2
Příloha 7	Protokol o zkoušení (2.1) č. P/1528/12, počet listů - 5
Příloha 8	Protokol o zkoušení (2.1) č. 261L12, počet listů - 2
Příloha 9	Protokol o zkoušení (3) č. P/1529/12, počet listů - 5
Příloha 10	Protokol o zkoušení (3) č. 266L12, počet listů - 2